

А. Д. МАРГОЛИН, В. П. КАРПОВ

ГОРЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ГАЗА

(Представлено академиком В. Н. Кондратьевым 17 VII 1973)

Несмотря на широкое использование горения в закрученных потоках в технике, этот процесс изучен мало. В работах ⁽¹⁻³⁾ авторы ограничились констатацией факта увеличения скорости сгорания при вращении газовой смеси. В работе ⁽⁴⁾ исследовалось влияние вращения на пределы распространения пламени.

В настоящей работе теоретически и экспериментально изучено распространение пламени по вращающейся газовой смеси, при этом проводилась скоростная киносъемка по шпирен-методу или измерялось время прихода пламени в данную точку камеры сгорания по регистрациям ионизационного тока. Использовались камеры сгорания цилиндрической формы диаметром 80 и 200 мм и высотой 50 мм. Камера диаметром 80 мм в торцах имела оптические стекла и использовалась для киносъемки. Камера сгорания приводилась во вращение, газ в камере по простейшему некоторого времени вращался вместе с камерой по закону твердого тела. Поджиг смеси осуществлялся искрой.

При поджиге смеси на максимальном удалении от оси вращения образовавшийся очаг пламени в виде увеличивающегося неправильного сегмента движется к оси вращения (рис. 1). Достигнув центра, очаг пламени трансформируется в тело вращения. Скорость распространения пламени из центра камеры примерно равна или меньше видимой скорости в покоящейся смеси. При исследовании околопредельных составов смесей было об-

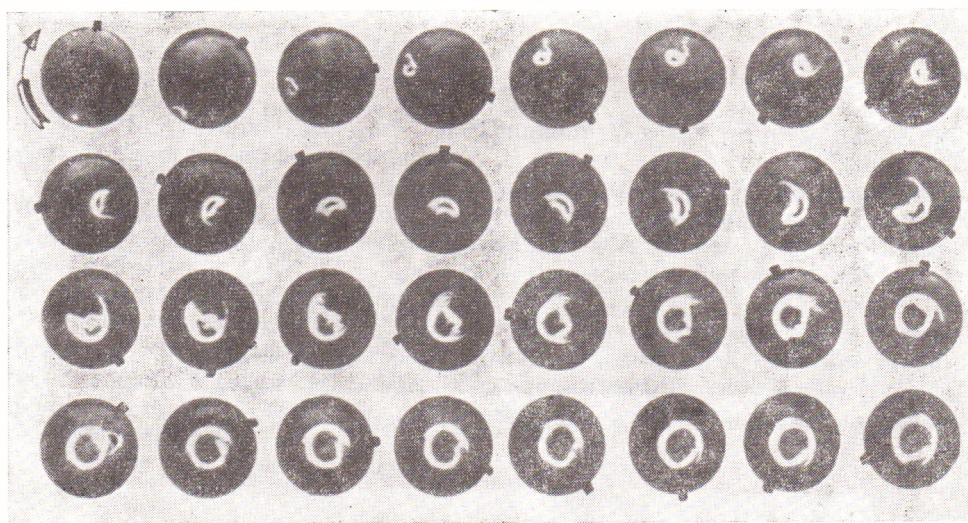


Рис. 1. Распространение пламени по смеси воздух+5,3% C_2H_2 во вращающейся бомбе при $\omega=130 \text{ сек}^{-1}$, $\Delta t=4,5 \text{ мсек}$

наружено, что из центра пламя распространяется лишь до определенного размера и затем гаснет.

Рассмотрим движение очага пламени во вращающемся газе. Считая, что очаг имеет сферическую форму, запишем уравнение движения пламенной сферы переменного радиуса r в поле массовых сил g при наличии сопротивления с коэффициентом α

$$(\rho_1 + \frac{1}{2}\rho_0) \frac{\partial}{\partial t} (\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot v) + \alpha \rho_0 \frac{v^2}{2} \pi r^2 - \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_0 - \rho_1) g = 0, \quad (1)$$

где ρ_0 и ρ_1 — плотность соответственно свежей смеси и продуктов, v — скорость движения пламенной сферы.

Движение очага пламени в газе, вращающемся по закону твердого тела с угловой скоростью ω , при пренебрежении сопротивлением и в предположении, что тангенциальная скорость очага равна скорости газа, описывается уравнением, полученным из (1):

$$\frac{d^2\xi}{d\tau^2} + \frac{3}{\tau} \frac{d\xi}{d\tau} + \xi = 0, \quad (2)$$

где $\xi = y/R_0$, $\tau = t\omega [2(\rho_0 - \rho_1)/(\rho_0 + 2\rho_1)]^{1/2} = t\omega b$, y — расстояние от центра очага до оси вращения.

Поджигание смеси на расстоянии R_0 от оси вращения соответствует начальному условию

$$\tau = 0, \quad \xi = 1, \quad d\xi/d\tau = 0. \quad (3)$$

Уравнение (2) получено в предположении постоянства видимой скорости распространения пламени w . При этом радиус пламенной сферы растет линейно, $r = r_0 + wt$, причем r_0 мало, т. е.

$$r_0 \ll w/\omega. \quad (4)$$

Проинтегрировав систему (2), (3), получим закон движения центра пламенной сферы

$$y = \frac{2R_0}{b\omega t} \cdot J_1(b\omega t). \quad (5)$$

Центр пламенной сферы движется к оси вращения со скоростью

$$\frac{dy}{dt} = \frac{2R_0}{t} \left(J_0(\tau) - \frac{2}{\tau} \cdot J_1(\tau) \right) \quad (6)$$

и достигает ось вращения через время $\tau = \tau_{11}$ ($\tau_{11} = 3,8317$ — первый корень функции Бесселя первого порядка первого рода $J_1(\tau)$) или $\omega t = 3,8/b$, пересекает ось и затем совершает затухающие колебания относительно оси вращения. Время прихода фронта пламени, подожженного в точке на расстоянии R_0 от центра, в точку, находящуюся на радиусе R , описывается уравнением

$$R + wt = \frac{2R_0}{b\omega t} \cdot J_1(b\omega t). \quad (7)$$

В описываемых опытах регистрировалось время появления пламени в точке $R = 26$ мм, в которой был установлен ионизационный зонд. Рассчи-

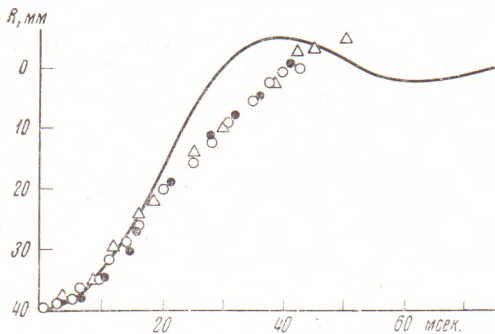


Рис. 2. Движение центра очага пламени. Условия те же, что на рис. 1

довательных кинокадров. Там же приведена кривая, рассчитанная по уравнению (5). Экспериментальные данные качественно правильно описываются теорией, однако близки центра очаг пламени движется несколько медленнее, чем следует из уравнения (5). По-видимому, это объясняется тем, что решение исходного уравнения (1) получено при пренебрежении силой сопротивления.

Анализ движения очага в вихре с постоянной величиной $\Gamma = \omega R^n$ показывает, что при отсутствии сопротивления время достижения оси вращения связано с угловой скоростью ω , в месте поджигания уравнением $\omega, t = \text{const}$. Величина const при $n=2$ в несколько раз меньше, чем для разобранного выше случая $n=0$.

В противоположном предельном случае, когда силы сопротивления значительно превышают инерционные, время движения очага к оси вращения определяется соотношением

$$\omega, t = a \left[\frac{w}{\alpha} (1 - \rho_1 / \rho_0) \right]^{-1/2} (\omega_1 R_1)^{1/2}, \quad (8)$$

где $a=1,5$ при $n=0$ и $a=0,5$ при $n=2$.

Это соотношение, показывающее, что произведение ω, t слабо зависит от параметров задачи, т. е. приближенно $\omega, t \approx \text{const}$, получено из уравнения (1) в предположении, что очаг пламени движется с той же угловой скоростью, что и газ и $r_0 \omega / w \ll 1$.

Таблица 1

	5,3% CH ₄															
	R ₀ = 94 мм					R ₀ = 74 мм					R ₀ = 54 мм					
ω , сек ⁻¹	44	56	63	76	100	50	63	77	100	116	132	76	100	150		
t_3 , msec	59	45	45	42	32	45	42	35	28	25	18	26	24	22		
t_p , msec	53	43	37	32	25	43	35	29	23	20	18	23	19	13		
	5,7% CH ₄					6% CH ₄					9,3% CH ₄					
ω , сек ⁻¹	91	107	125	138	163	41	50	75	91	110	119	150	94	100	125	154
t_3 , msec	32	30	25	22	20	40	35	32	28	30	26	26	15	13,5	12	12
t_p , msec	27	22	19	17	14,5	41	36	28	23	19,8	18,5	16	13,5	13	11,5	10

Итак, во вращающемся газе очаг пламени движется к оси вращения и достигает ее за время порядка периода вращения газа в месте поджигания.

Видимая радиальная скорость распространения пламени от оси вращения газа может быть меньше скорости в неподвижной смеси, вероятно, из-за постепенного увеличения отношения длины горящего вращающегося очага пламени вдоль оси вращения к радиусу.

Движение очагов пламени и продуктов сгорания в поле ускорений необходимо учитывать при построении математической модели турбулентного горения, а также при анализе работы камер сгорания и топков с закрученным потоком газа и поворотами потока, таких как циклонные топки и т. д.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
10 VII 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ P. D. McCormack, Proc. Roy. Irish Acad., Sec. A, № 6, 71 (1971). ² P. D. McCormack, K. Scheller et al., Combustion and Flame, v. 19, № 2, 297 (1972). ³ G. D. Lewes, XIII Symposium on Combustion, 1973, p. 625. ⁴ В. Н. Кривулин, Л. А. Ловачев и др., Горение и взрыв. Матер. III Всесоюзн. симпозиума по горению и взрыву, «Наука», 1972.